



# Erosion et altération chimiques actuelles sur roches métamorphiques dans le massif des Maures (Var, France)

Claude Martin

## ► To cite this version:

Claude Martin. Erosion et altération chimiques actuelles sur roches métamorphiques dans le massif des Maures (Var, France). Sciences Géologiques Bulletin, 1989, 42 (2), pp.91-106. hal-00419448

**HAL Id: hal-00419448**

**<https://hal.science/hal-00419448>**

Submitted on 23 Sep 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ÉROSION ET ALTÉRATION CHIMIQUES ACTUELLES SUR ROCHES MÉTAMORPHIQUES DANS LE MASSIF DES MAURES (VAR, FRANCE)

Claude MARTIN \*

\* : CNRS, URA 903, Institut de Géographie, 29 avenue Robert Schuman, 13 621 AIX-EN-PROVENCE, FRANCE.

**RÉSUMÉ :** Les mesures de l'érosion chimique débouchent sur l'établissement de bilans géochimiques de l'altération actuelle. Les vitesses de désodisation totale des roches se révèlent très fortes (18 à 30 mm de roches saines / 1000 ans). Cependant la minceur des formations superficielles récentes s'explique par la modestie de l'arénisation depuis la fin de la dernière période glaciaire.

Roches métamorphiques, Erosion chimique, Bilan d'altération, Erosion mécanique, Bassins versants, France méditerranéenne.

## **Present chemical erosion and metamorphic rock weathering in the massif des Maures (Var, France)**

**ABSTRACT:** The measurements of rock dissolution allow the present chemical balances to be established. The sodium losses – which can be estimated to 18 to 30 mm of rock weathering for 1 000 years – appear very high. However, the thinness of the recent superficial formation results certainly from the smallness of the fall speed of the sandy face after the end of the last glacial period.

Metamorphic rocks, Chemical erosion, Weathering balances, Mechanical erosion, Drainage basins, Mediterranean south of France

## **INTRODUCTION**

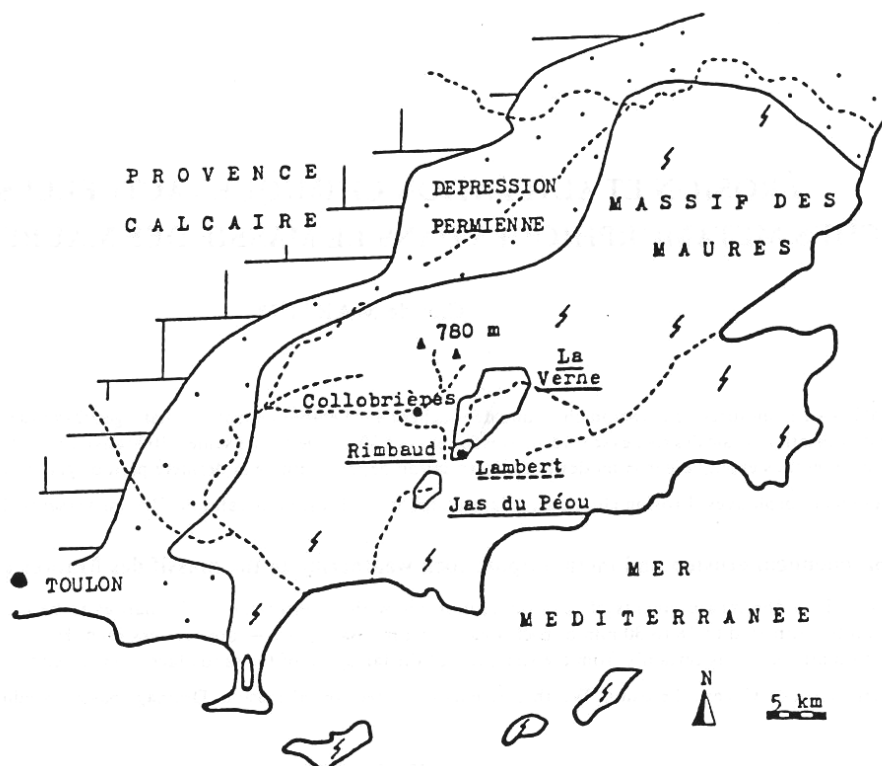
Les recherches sur l'érosion et l'altération chimiques actuelles menées sur les roches métamorphiques du massif des Maures s'inscrivent dans le cadre d'un travail sur la dynamique des versants (MARTIN, 1986). Celui-ci repose sur une approche et des méthodes géomorphologiques, pédologiques, hydrologiques et géochimiques. Ses objectifs visent notamment à quantifier la météorisation chimique à partir des flux de produits dissous, à établir les bilans chimico-minéralogiques des profils de sols et d'altérites et à cerner l'action des phénomènes d'érosion mécanique. Cette démarche se rattache à un courant de recherches qui n'a cessé de se développer en France depuis de nombreuses années (MATHIEU, 1972 ; TRESCASES, 1973 ; GAC, 1979 ; GUIGO, 1979 ; BLOT, 1980 ; ROOSE, 1980 ; LOYE-PILOT, 1987 ; LELONG et VEDRAOGO-DUMAZET, 1987 ; MIETTON, 1988 ; etc.).

Dans cet article, l'accent portera sur les mesures de l'érosion chimique de petits bassins versants, la définition des caractères de l'altération chimique actuelle et l'étude de l'approfondissement des profils pédologiques.

## **I - LE CADRE DE L'ÉTUDE**

Situé dans la partie occidentale du massif des Maures, le terrain d'étude présente des altitudes inférieures à 800 m. La dissection du relief n'en est pas moins très poussée, en raison de la proximité de la mer (Fig. 1).

Figure 1  
Schéma de localisation.  
*Location map.*



Les sols les plus largement représentés sont très peu épais (moins de 30 cm en moyenne), légèrement acides, très sableux (les éléments supérieurs à 0,05 mm représentent plus de 60 % de la terre fine) et caillouteux. Les matériaux sont remaniés. Ces sols appartiennent à la classe des rankers. Ils recouvrent le plus souvent des roches altérées cohérentes, au pendage très redressé. L'horizon A<sub>12</sub>, qui possède une structure particulière à submotteuse, est surmonté par un horizon A<sub>11</sub> très mince, de structure particulière à grumeleuse, plus riche en matière organique (teneur > 7 %, contre 3-4 % en A<sub>12</sub>). Les fractions < 2 µm renferment des kaolinites, des illites-micas et des vermiculites plus ou moins hydroxyalumineuses.

Le climat est de type méditerranéen humide (précipitations annuelles moyennes à Collobrières = 1067,5 mm sur 53 ans ; température moyenne = 13,8 °C). Les pluies ont une origine marine. Elles sont amenées par les vents d'est à sud-est. Elles se produisent presque exclusivement d'octobre à mars. Les ruisseaux, à sec pendant une partie de l'été, connaissent des hautes eaux en automne et en hiver. L'écoulement réagit alors très rapidement et violemment aux précipitations.

Le couvert végétal, souvent très dégradé, est essentiellement constitué de pinèdes et de suberaies envahies par le maquis.

## II - LES MESURES HYDROGÉOCHIMIQUES

### 1. Organisation des recherches

Parmi les huit bassins versants étudiés dans le massif des Maures, trois se sont révélés

particulièrement intéressants pour l'étude de l'évolution actuelle des roches métamorphiques : ceux de La Verne (20,93 km<sup>2</sup>), du Rimbaud (1,46 km<sup>2</sup>) et du Jas du Péou (3,37 km<sup>2</sup>). Leurs principaux caractères sont présentés dans le tableau I.

Tableau I  
**Caractères morphologiques et lithologiques des bassins versants.**  
*Morphological parameters and lithology of the drainage basins.*

Paramètres topographiques	La Verne	Rimbaud	Jas du Péou
Altitudes extrêmes, m	100-654	470-622	134-603
Densité de drainage, km/km <sup>2</sup>	3,18	4,86	3,74
Pente moyenne des versants	14°	9°	15,5°
Caractères lithologiques, en % de la surface totale	La Verne	Rimbaud	Jas du Péou
Micaschistes	25	0	18
Leptynites + amphibolites	0	0	2
Leptynites, gneiss et micaschistes	10	0	0
Gneiss	65	100	80

Les investigations sur ces trois bassins versants ont nécessité l'analyse de plus de 300 échantillons d'eaux de pluie et de ruisseau. Nous en avons traité le plus grand nombre – par volumétrie (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>), colorimétrie (SiO<sub>2</sub>, Al<sup>3+</sup>, fer total), turbidimétrie (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et photométrie de flamme (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>). Cependant une partie des échantillons prélevés sur le bassin versant du Jas du Péou ont été confiés au Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen. Ce laboratoire utilise la spectrométrie d'absorption atomique pour la silice, le calcium et le magnésium, et la colorimétrie pour les chlorures. Nous avons toujours vérifié la bonne correspondance entre les résultats obtenus par les différents analystes.

Le réseau d'observation hydrologique (pluviographes, limnigraphes) est géré par le CEMAGREF, la Société du Canal de Provence et le Service Régional d'Aménagement des Eaux.

## 2. Quantification des exportations en solution

Les mesures des exportations en solution portent sur les périodes septembre 1976 - août 1979 dans les bassins versants de La Verne et du Rimbaud et septembre 1978 - janvier 1980 dans celui du Jas du Péou.

La composition chimique des eaux des ruisseaux varie beaucoup en fonction des conditions hydrologiques (Tab. II). Les teneurs sont liées aux débits par des relations généralement bilogarithmiques. De telles corrélations sont fréquentes dans les petits bassins versants relativement homogènes (MATHIEU, 1972 ; WALLING, 1971, 1978). Elles se révèlent particulièrement satisfaisantes lorsqu'elles sont établies pour une phase hydrologique de récession (MARTIN, 1981, 1987). Les coefficients de corrélation linéaire (r) entre les logarithmes des débits et des teneurs sont négatifs pour tous les éléments, sauf le potassium. Leur valeur absolue dépasse généralement 0,95 (avec un nombre n de points observés = 3 à 7).

Tableau II

**Valeurs extrêmes du débit des ruisseaux (Q) et des teneurs en produits dissous (mg/l) lors des prélèvements.** LV : La Verne ; R : Rimbaud ; JP : Jas du Péou.

*Maximum and minimum discharge values (Q) and solute concentrations (mg/l) in runoff water corresponding to the samples. LV: La Verne; R: Rimbaud; JP: Jas du Péou.*

	Q (l/s)	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
LV	4-16430	5,6-14	2,7-6,1	1,1-3,3	0,5-1,7	5,3-13	6,0-19	8,8-28	4,1-15
R	0,01-3089	3,0-11	2,6-6,2	0,9-2,4	0,3-1,0	3,3-7,8	4,2-13	6,5-15	3,6-16
JP	0,1-1080	7,7-13	6,2-13	3,1-7,8	1,0-1,9	7,7-16	12-28	20-52	12-28

Ainsi, pour chaque phase hydrologique de récession, il est possible de calculer une série d'équations permettant de déterminer la teneur des eaux en chaque élément dissous, à partir du débit. Il suffit de disposer au minimum de deux prélèvements pour des débits très différents. Les exportations en solution sont calculées selon la méthode des pas de temps variables, en considérant tous les points de l'hydrogramme utilisés pour évaluer l'écoulement (MARTIN, 1981). Evidemment, le passage d'une série d'équations à la suivante se produit au cours d'une montée de crue, heureusement presque toujours très rapide. Il est d'ailleurs possible d'établir, si nécessaire, une série d'équations pour la montée de crue elle-même.

### 3. Détermination des apports en solution

Les entrées d'éléments minéraux atmosphériques sont mesurées dans des collecteurs ouverts en permanence. Ces appareils recueillent à la fois les poussières sèches, les aérosols et les eaux de pluie. Les données obtenues à la station de Lambert, dans le bassin versant du Rimbaud (Fig. 1) sont résumées dans le tableau III.

Tableau III

**Apports d'éléments minéraux atmosphériques à la station de Lambert -septembre 1976 - août 1980 : précipitations = 1290 mm/an).** e : entrées spécifiques annuelles moyennes ;

C : concentrations moyennes dans les eaux recueillies. Les ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (1,2 à 8,4 mg/l) et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (1,2 à 15,0 mg/l) n'ont pas été dosés de façon systématique.

*Atmospheric inputs of mineral substances at the testing station of Lambert (September 1976 - August 1980; rainfalls = 1290 mm/year). e: mean annual specific inputs; C: average concentrations in rainwater. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were not systematically dosed (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: 1.2 to 8.4 mg/l; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 1.2 to 15.0 mg/l).*

	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
e (t/km <sup>2</sup> /an)	0,00	1,67	0,37	0,18	2,03	4,62
C (mg/l)	0,00	1,29	0,28	0,14	1,57	3,59

Les ions Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup> ont surtout une origine marine. Les teneurs en sodium et en magnésium sont liées, chaque année, aux concentrations en ions chlorures par de très fortes corrélations linéaires. Les coefficients de corrélation sont particulièrement élevés dans le cas du sodium (r atteint +0,99 à la station de Lambert en 1979-80, avec n = 21). Les droites de régression annuelles fournissent une estimation des teneurs moyennes avec un écart relatif très faible (à la station de Lambert : -1,7 à +3,5 % pour Na<sup>+</sup> et -8,7 à +6,7 % pour Mg<sup>2+</sup>, sur la période septembre 1976 - août 1980).

Le calcium a une origine continentale. Les eaux recueillies sur l'ensemble de la région présentent généralement des teneurs en cet élément très voisines. La quasi-totalité du calcium est donc vraisemblablement apportée, par les eaux de pluie, directement en solution.

Enfin, le potassium manifeste une double origine, marine et continentale.

Les entrées d'éléments minéraux atmosphériques dans les bassins versants sont calculées à partir des précipitations enregistrées par les pluviographes et des teneurs mesurées dans les eaux recueillies par les collecteurs. Cependant, pour certains éléments, il faut tenir compte du fait que la végétation constitue un piège à poussières sèches et à aérosols plus efficace que les collecteurs. Les teneurs moyennes des eaux d'infiltration en ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  sont donc déduites également des exportations d'ions  $\text{Cl}^-$ .

Les ions chlorures participent peu aux cycles biogéochimiques et sont facilement évacués des bassins versants. En l'absence de roches chlorurées et sous climat suffisamment humide, les entrées correspondent toujours approximativement aux sorties. À l'échelle annuelle, le rapport entre les exportations d'ions  $\text{Cl}^-$  et le volume des précipitations fournit alors une valeur représentative de la teneur moyenne annuelle des eaux d'infiltration en cet élément (teneur théorique,  $\text{Cl}^-t$ ). L'absence de roches chlorurées dans les bassins versants est démontrée par comparaison des entrées et des sorties mesurées. Ainsi, dans le bassin versant du Rimbaud, les entrées mesurées au niveau d'une case lysimétrique en terrain défriché atteignent en moyenne  $4,30 \text{ t/km}^2/\text{an}$  ( $P = 1269 \text{ mm}$ ; teneur moyenne =  $3,39 \text{ mg/l}$ ) et les sorties à l'exutoire du bassin versant,  $5,46 \text{ t/km}^2/\text{an}$  ( $P = 1414 \text{ mm}$ ; teneur moyenne des eaux d'infiltration =  $3,86 \text{ mg/l}$ ). Or, sur une période de plusieurs mois, les teneurs moyennes en ions  $\text{Cl}^-$  des eaux d'infiltration s'élèvent à  $2,96 \text{ mg/l}$  seulement au niveau de la case en terrain défriché, contre  $3,49 \text{ mg/l}$  sous bruyères arborescentes. Les entrées réelles d'ions chlorures avoisinent donc certainement les sorties.

Les teneurs annuelles moyennes des eaux d'infiltration en ions  $\text{Cl}^-$  servent à calculer les teneurs en sodium et en magnésium, grâce aux bonnes corrélations trouvées dans les eaux recueillies par les collecteurs :

$$\text{teneur moyenne annuelle (mg/l)} = [a \text{ Cl}^-t \text{ (mg/l)} = b] \times c \quad (1)$$

où, pour chaque élément, a et b sont les termes de l'équation de régression annuelle et c, le coefficient correcteur de l'écart relevé pour l'année, au niveau du collecteur référence, entre la teneur moyenne calculée avec l'équation de régression annuelle et la teneur moyenne effectivement mesurée.

Les teneurs en potassium sont évaluées à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{K}^+ \text{ (mg/l)} = (0,02 \text{ Cl}^-t) + b \quad (2)$$

où  $0,02 \text{ Cl}^-t$  représente les entrées d'origine marine (mg/l) et b, les entrées d'origine continentale ( $b = \text{teneur moyenne en ions K}^+ - 0,02 \text{ Cl}^-$ , dans le collecteur référence).

Ajoutons, pour finir, que la composition chimique des eaux interceptées par les collecteurs ne donne aucune indication valable sur les apports réels d'ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les bassins versants, une partie de ces éléments se formant au niveau de la biosphère par transformation de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{SO}_2$  atmosphériques.

#### 4. Bilans hydrogéochimiques annuels

Le tableau IV fournit, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour le bassin versant de La Verne. Dans tous les cas, les départs de fer et d'aluminium sont négligeables.

Tableau IV

**Bassin versant de La Verne : bilans hydrogéochimiques annuels (septembre 1976 - août 1979).**e : entrées ; s : sorties ; E : érosion, t/km<sup>2</sup>/an ( $E = e - s$ ) ; P : précipitations ; D : drainage.**La Verne drainage basin: annual hydrogeochemical balances (September 1976 - August 1979).**e: inputs; s: outputs; E: erosion, t/km<sup>2</sup>/year ( $E = e - s$ ); P: rainfalls; D: drainage.

	1976-77 P = 1902 mm D = 1128 mm			1977-78 P = 1419 mm D = 873 mm			1979-80 P = 913 mm D = 424 mm		
	e	s	E	e	s	E	e	s	E
SiO <sub>2</sub>	0,00	10,77	-10,77	0,00	7,34	-7,34	0,00	3,79	-3,79
Ca <sup>2+</sup>	2,77	3,50	-0,73	1,50	2,90	-1,40	1,16	1,58	-0,42
Mg <sup>2+</sup>	0,68	1,55	-0,87	0,37	1,08	-0,71	0,39	0,68	-0,29
K <sup>+</sup>	0,29	0,84	-0,55	0,17	0,67	-0,50	0,25	0,32	-0,08
Na <sup>+</sup>	4,35	7,96	-3,61	3,00	5,39	-2,39	2,06	2,89	-0,83
Cl <sup>-</sup>	8,13	8,13	0,00	6,73	6,73	0,00	4,44	4,44	0,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		14,77			10,37			4,51	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		9,52			6,16			4,25	

**III - LES CARACTÈRES DE L'ALTÉRATION ACTUELLE****1. Extension des données dans le temps**

L'extension des données hydrométriques est fondée sur la notion d'écoulement potentiel (EP). Au niveau mensuel, les précipitations disponibles pour un écoulement potentiel (PEP) sont égales à la différence entre les hauteurs d'eau précipitées et l'évapotranspiration potentielle selon la formule de TURC. L'EP annuel correspond à la somme des PEP mensuelles d'une série de mois consécutifs choisie de manière à obtenir la plus forte valeur possible. L'étude des régressions linéaires entre l'EP calculé à Collobrières et les volumes d'eau écoulés chaque année pendant la période des mesures hydrométriques ( $r = +,87$  à  $+,94$ , avec  $n = 9$  à  $12$ ) fournit les équations permettant de calculer les écoulements annuels pour toutes les années pour lesquelles on dispose de données pluviométriques à Collobrières (53 ans).

Dans les bassins versants de La Verne et du Rimbaud, les données sur les exportations en solution sont traitées par types de situations hydrologiques (mois où l'écoulement s'organise, mois d'automne, mois d'hiver, *etc.* – année normale, année à automne très sec, année à automne très pluvieux). Les corrélations bilogarithmiques entre les volumes d'eau écoulés et les exportations en solution mensuelles pendant la période des mesures hydrochimiques fournissent les équations permettant de calculer, mois par mois, les exportations en solution pour toutes les années pour lesquelles on dispose de données hydrométriques ( $r > +0,995$  le plus souvent, avec  $n = 3$  à  $9$ ). Ces résultats servent à établir les droites de régression entre les logarithmes des volumes d'eau écoulés chaque année et des exportations annuelles sur la période des observations hydrométriques ( $r > +0,99$  le plus souvent, avec  $n = 3$  à  $6$ ). On peut donc, en définitive, déterminer les exportations en solution pour toutes les années pour lesquelles on dispose de données pluviométriques à Collobrières.

Dans le bassin versant du Jas du Péou, les mesures hydrochimiques portent sur une période beaucoup trop courte pour que l'on puisse regrouper, de façon systématique, les données recueillies

par types de situations hydrologiques. Cependant il existe de bonnes corrélations bilogarithmiques entre les volumes d'eau écoulés et les exportations en solution mensuelles ( $r > +0,99$ ).

Finalement, les valeurs calculées sont à la fois représentatives des conditions climatiques de la période étendue et de conditions propres à la période des mesures hydrochimiques, en particulier de l'état du couvert végétal et, dans une certaine mesure, des entrées d'éléments minéraux atmosphériques.

La quantification des apports atmosphériques doit s'appuyer, de son côté, sur une évaluation des teneurs moyennes des eaux d'infiltration en produits d'origine atmosphérique. Pour le calcium, le magnésium et le potassium, éléments fortement retenus dans les bassins versants, nous adoptons les teneurs moyennes calculées sur la période septembre 1976 - août 1980. Dans le cas du sodium, éléments beaucoup plus mobile, les teneurs moyennes sont déduites des valeurs des exportations d'ions  $\text{Cl}^-$  sur la période étendue :

$$\text{Na}^+ (\text{mg/l}) = [\text{Cl}^- (\text{t/km}^2/\text{an}) \times c] / P (\text{m/an}) \quad (3)$$

où  $c$  représente la valeur moyenne du rapport pondéral  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  dans les eaux précipitées sur les bassins versants pendant la période des mesures hydrochimiques.

Le tableau V dresse les bilans hydrogéochimiques annuels moyens pour la période étendue de 53 ans. Dans le bassin versant du Jas du Péou, les amphibolites font figure de roches très particulières, d'autant qu'elles renferment parfois de la calcite. Le tableau fournit donc une estimation de l'érosion pour les seuls affleurements de gneiss, migmatites et micaschistes, afin de prendre en considération un ensemble lithologique relativement homogène.

Tableau V

**Bilans hydrogéochimiques annuels moyens sur une période étendue de 53 ans.**

$e$  : entrées ;  $s$  : sorties ;  $E$  : érosion, en  $\text{t/km}^2/\text{an}$  ( $E = e - s$ ) ;  $E'$  : érosion sur gneiss, migmatites et micaschistes (la part revenant à l'ensemble leptynites-amphibolites étant estimée à partir des mesures de l'érosion chimique de deux bassins versants riches en amphibolites qui ont aussi été étudiés, des analyses d'eaux de sources et du bilan géochimique d'un profil sur amphibolites) ;

$P$  : précipitations ;  $D$  : drainage.

***Mean annual hydrogeochemical balances for an extended period of 53 years.***

*a: inputs; s: outputs; E: erosion, t/km<sup>2</sup>/year ( $E = e - s$ ); E': erosion on gneiss, migmatites and micaschists; P: rainfalls; D: drainage.*

	La Verne P = 1182 mm D = 577 mm			Rimbaud P = 1197 mm D = 647 mm			Jas du Péou P = 994 mm D = 328 mm			
	e	s	E	e	s	E	e	s	E	E'
$\text{SiO}_2$	0,00	5,39	-5,39	0,00	4,17	-4,17	0,00	3,28	-3,28	-3,00
$\text{Ca}^{2+}$	1,53	1,99	-0,46	1,55	2,27	-0,72	1,28	2,32	-1,04	-0,75
$\text{Mg}^{2+}$	0,43	0,81	-0,38	0,39	0,80	-0,41	0,28	1,25	-0,97	-0,91
$\text{K}^+$	0,17	0,44	-0,27	0,16	0,35	-0,19	0,12	0,36	-0,24	-0,22
$\text{Na}^+$	2,41	3,90	-1,48	2,04	3,32	-1,28	2,04	3,01	-0,96	-0,89

## 2. Ordre de départ des éléments minéraux

Les bilans hydrogéochimiques, ainsi que l'étude géochimique des profils d'altération (Tab. VI), permettent de calculer les indices de mobilité ( $I_i$ ) des éléments minéraux ( $i$ ), en



comparant les pertes enregistrées avec la composition chimique des matériaux parentaux, puis avec le comportement du sodium dont l'indice est fixé conventionnellement à 1000 (TARDY, 1969) :

$$I.i = (p.i / m.i) \times (m.Na^+ / p.Na^+) \times 1000 \quad (4)$$

où p.i représente les pertes en l'élément i dans les bilans hydrogéochimiques (t/km<sup>2</sup>/an) ou dans les bilans géochimiques (g/100 g de roches saines) ; p.Na<sup>+</sup>, les pertes en sodium ; m.i, la teneur (g/100 g) en l'élément i des matériaux parentaux (roches saines pour les bilans géochimiques – ensemble des matériaux soumis à la dissolution pour les bilans hydrogéochimiques ; et m.Na<sup>+</sup>, la teneur en sodium des matériaux parentaux.

Tableau VI

**Composition chimique moyenne des matériaux minéraux des bassins versants étudiés.**

Les teneurs sont exprimées en g/100 g de roches saines séchées à 105 °C, après soustraction des cations basiques échangeables ; les comparaisons sont menées selon la méthode isoquartz.

Rs : roches saines ; E.ma : ensemble des matériaux altérés ; \* : sur gneiss, migmatites et micaschistes ; K<sub>2</sub>O biot. : K<sub>2</sub>O des biotites ou provenant de ces minéraux (= 0,1966 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> % + 0,3895 MgO %) ; éléments échangeables en E.ma : CaO = 0,011 %, MgO = 0,005 % ; K<sub>2</sub>O = 0,012 % ; Na<sub>2</sub>O = 0,003 %.

**Mean chemical composition of different mineral formations of the studied drainage basins.**

Contents are given in g/100 g of fresh rocks dried at 105 °C, without exchangeable basic cations; comparison by isoquartz method. Rs: fresh rocks; E.ma: total weathered materials; \*: on gneiss, migmatites and micaschists; K<sub>2</sub>O biot.: K<sub>2</sub>O of biotites or coming from these minerals (= 0,1966 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> % + 0,3895 MgO %); exchangeable elements in E.ma: CaO = 0,011 %, MgO = 0,005 % ; K<sub>2</sub>O = 0,012 % ; Na<sub>2</sub>O = 0,003 %.

Bassins Eléments	La Verne		Rimbaud		Jas du Péou *	
	Rs	E.ma	Rs	E.ma	Rs	E.ma
SiO <sub>2</sub>	65,45	64,01	71,22	69,69	63,65	62,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,87	16,88	14,28	14,29	18,03	18,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	5,56	5,56	4,21	4,21	6,09	6,09
CaO	1,02	0,79	0,95	0,73	0,83	0,66
MgO	1,62	1,57	1,12	1,09	1,49	1,45
K <sub>2</sub> O	4,13	4,05	3,65	3,59	4,32	4,25
Na <sub>2</sub> O	2,40	2,04	2,62	2,23	2,37	2,05
SiO <sub>2</sub> combinée	35,58	34,14	33,38	31,85	35,18	33,93
K <sub>2</sub> O biot.	1,72	1,65	1,26	1,21	1,78	1,71

Par cette méthode, nous avons calculé un indice d'évacuation entre les roches saines et l'ensemble des matériaux altérés (I.ec) et un indice de lixiviation (I.L) entre les bilans hydrogéochimiques et l'ensemble des matériaux altérés. Les valeurs trouvées figurent dans le tableau VII. Certes, les caractères géochimiques des profils d'altération résultent d'une évolution sur une période très longue, alors que les bilans hydrogéochimiques traduisent des phénomènes ponctuels dans le temps. Mais la comparaison des résultats obtenus est malgré tout intéressante, surtout dans une région comme le massif des Maures où les matériaux altérés n'ont pas subi une désalcanisation très poussée.

Tableau VII

**Indices de mobilité des éléments minéraux.**

I.ec : indice d'évacuation corrigé (entre Rs et E.ma – avec les cations basiques échangeables, diminués des éléments fournis par les apports atmosphériques ; MARTIN, 1986) ; I.L : indice de lixiviation (entre les bilans hydrogéochimiques et E.ma – sans les cations basiques échangeables) ; SiO<sub>2</sub> co. : silice combinée ; K biot. : potassium des biotites (Tab. VI) ; \* : sur gneiss, migmatites et leptynites. Les éléments sont présentés par ordre de mobilité croissante.

**Mineral element mobility indexes.**

*I.ec: evacuation corrected index (between Rs and E.ma – considering exchangeable basic cations, without elements coming from atmospheric inputs); I.L: leaching index (between hydrogeochemical flux balances and E.ma – without exchangeable basic cations); SiO<sub>2</sub> co.: combined silica; K biot.: potassium of biotites (Tab. VI); \*: on gneiss, migmatites and micaschists. The elements classified by increasing mobility.*

La Verne	Al,	Fer	<	K	<	Mg	<	SiO <sub>2</sub> co.,	K biot.	<	Na	<	Ca		
- I.ec	=	0		114		203		271	272		1000		1518		
- I.L	=	Al,	Fer	<	K	<	SiO <sub>2</sub> co.	<	K biot.	<	Mg	<	Na		
		0		81		161		198	414		839		1000		
Rimbaud	Al,	Fer	<	K	<	Mg	<	K biot.	<	SiO <sub>2</sub> co.	<	Na	<	Ca	
- I.ec	=	0		92		203		265	307		1000		1524		
- I.L	=	Al,	Fer	<	K	<	SiO <sub>2</sub> co.	<	K biot.	<	Mg	<	Na	<	Ca
		0		84		169		250	806		1000		1776		
Jas du Péou	Al,	Fer	<	K	<	Mg	<	SiO <sub>2</sub> co.,	K biot.	<	Na	<	Ca		
- I.ec	=	0		110		207		261	268		1000		1521		
- I.L	=	Al,	Fer	<	K	<	SiO <sub>2</sub> co.	<	K biot.	<	Mg	<	Na	<	Ca
		0		106		151		265	1000		1780		2733		

Les indices d'évacuation du fer, de l'aluminium et du magnésium correspondent à une altération hydrolytique en milieu faiblement acide (PÉDRO, 1968). L'altération actuelle se produit elle-même dans un milieu modérément acide (pH des eaux de source, toujours supérieur à 5,6). Les séquences d'évacuation traduisent donc certainement des évolutions géochimiques assez proches des transformations en cours, sauf peut-être pour la silice dont l'indice varie beaucoup en fonction du caractère monosiallitique ou bisiallitique de l'altération.

Les séquences de lixiviation appellent deux séries de remarques :

- Premièrement : si l'on veut bien admettre que tout le potassium soustrait des matériaux minéraux provient des biotites, il semble que la végétation du bassin versant de La Verne fixe de cet élément dans sa biomasse pérenne (I.ec K<sup>+</sup> = 272 ; I.L = 198). Le rôle de la végétation est également visible sur le calcium (I.ec Ca<sup>2+</sup> = 1518 ; I.L = 839). En revanche, les cycles biogéochimiques apparaissent à l'équilibre dans les bassins versants du Rimbaud et du Jas du Péou.
- Deuxièmement : dans les bassins versants du Rimbaud et du Jas du Péou, les indices de lixiviation du calcium et du magnésium atteignent des valeurs très élevées par rapport aux indices d'évacuation (I.L Ca<sup>2+</sup> = 1776, contre I.ec = 1524, et I.L Mg<sup>2+</sup> = 806, contre I.ec = 203, dans le bassin versant du Rimbaud ; I.L Ca<sup>2+</sup> = 2733, contre I.ec = 1521, et I.L Mg<sup>2+</sup> = 1780, contre I.ec = 207, dans le bassin versant du Jas du Péou). Ni les cycles biogéochimiques (proches de l'équilibre ou accumulant des éléments minéraux dans la biomasse pérenne) ni l'altération actuelle des roches métamorphiques (altération hydrolytique en milieu faiblement acide) ne permettent d'expliquer ces résultats. Il faut donc admettre la présence occulte de roches sédimentaires. Ces roches ne renferment pas de chlorures. La stabilité des rapports SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup> dans les eaux des ruisseaux lors

des phases potamologiques de récession indique, en outre, qu'elles ne livrent pas d'ions sulfates. Il s'agit de roches carbonatées, vraisemblablement pincées le long des accidents tectoniques. Dans le bassin versant de La Verne, l'intervention des cycles biogéochimiques ne parvient pas à masquer totalement les effets de leur dissolution ( $I.L\ Mg^{2+} = 414$ , contre  $I.ec = 203$ ).

### 3. Pertes d'éléments minéraux

Les problèmes révélés dans le paragraphe précédent, joints à l'accumulation sous forme échangeable de cations basiques par les colloïdes, font que les bilans hydrogéochimiques annuels moyens ne traduisent pas fidèlement l'action des processus d'altération chimique sur les roches métamorphiques. Cependant, pour tous les éléments concernés (calcium, magnésium et potassium – notés i), on peut calculer les taux de libération (Tl) correspondant à l'altération des roches métamorphiques à l'aide de l'équation suivante :

$$Tl_i = [I.L_i \times \text{teneur } i_{Em.a} (\%) \times \text{érosion } Na^+ (t/km^2/an)] / [1000 \times \text{teneur } Na^+ E.ma (\%)] \quad (5)$$

où I.L représente l'indice de libération (calculé généralement pour l'évolution entre les roches saines et l'ensemble des matériaux altérés, après soustraction des cations basiques échangeables). Pour le potassium, les valeurs de I.L ont été déterminées en partant de l'hypothèse selon laquelle  $I.L = I.ec$  actuel dans les bassins versants du Rimbaud et du Jas du Péou.

Les bilans géochimiques annuels moyens de l'altération des roches métamorphiques se trouvent dressés dans le tableau VIII.

Tableau VIII

**Bilans géochimiques annuelles moyens de l'altération des roches métamorphiques sur la période étendue de 53 ans.** P : précipitations ; D : drainage.

*Mean annual geochemical budgets of the metamorphic rock weathering for the extended period of 53 years. P: rainfalls; D: drainage.*

Bassins versants	Roches	P (mm)	D (mm)	Pertes d'éléments (t/km <sup>2</sup> /an)					
				SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Total
La Verne	gneiss, micaschistes, leptynites	1 182	577	5,39	1,18	0,32	0,48	2,00	9,36
Rimbaud	gneiss	1 197	647	4,17	0,87	0,18	0,27	1,73	7,21
Jas du Péou	gneiss, migmatites, micaschistes	994	328	3,00	0,59	0,18	0,30	1,20	5,27

Pour apprécier, de façon globale, l'efficacité de l'altération actuelle, la méthode la plus appropriée consiste à déterminer la vitesse de désodisation totale des roches (Vd). Dans un secteur géographique donné, Vd correspond à la moyenne des vitesses de descente de tous les fronts de l'altération, depuis le front d'altération jusqu'à celui de désodisation totale (qui est encore virtuel dans le massif des Maures) :

$$Vd\ (mm/1\ 000\ ans) = [\text{érosion } Na^+ (t/km^2/an) \times 100] / [\text{teneur } Na^+ \text{ roches } (\%) \times \text{densité roches } (g/cm^3)] \quad (6)$$

Vd atteint 30 mm/1000 ans dans le bassin versant de La Verne, 24 mm/1000 ans dans le bassin versant du Rimbaud et 18 mm/1000 ans dans celui du Jas du Péou.

#### 4. Type géochimique de l'altération

Les bilans géochimiques de l'altération actuelle des roches métamorphiques servent à calculer les rapports moléculaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  des minéraux secondaires en voie de formation, suivant une méthode empruntée à Y. TARDY (1969) :

$$\text{RE} = (6 \text{ K}_2\text{O} + 6 \text{ Na}_2\text{O} + 2 \text{ CaO} - \text{SiO}_2) / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) \quad (7)$$

les pertes d'éléments minéraux étant exprimées en valeurs molaires.

L'altération actuelle manifeste une évolution nettement bisiallitique, avec des indices RE avoisinant 3,0 dans le bassin versant de La Verne et 3,2 dans les bassins versants du Rimbaud et du Jas du Péou.

Pourtant les diagrammes destinés à préciser les domaines de stabilité des alumino-silicates montrent que, dans le massif des Maures, la composition chimique des eaux des sources est en équilibre avec la kaolinite. Quelques échantillons occupent des plages correspondant à des argiles 2/1 (MARTIN, 1986) ; mais ces cas particuliers tiennent peut-être à une appréciation par défaut de la teneur des ions  $\text{H}^+$  des eaux profondes, par suite des phénomènes de dégazage en surface.

Une telle opposition entre une altération bisiallitique et des eaux en équilibre avec la kaolinite est fréquente dans la zone tempérée (TARDY, 1969 ; BOURRIÉ 1976 ; *etc.*). Elle s'explique aisément :

- Les précipitations abondantes et les températures modestes du massif des Maures favorisent une forte dilution des eaux gravitaires. Les eaux de source, peu chargées en produits dissous, se placent donc tout naturellement en équilibre avec la kaolinite.
- Cependant les diagrammes d'équilibre renseignent sur les minéraux à l'égard desquels les eaux analysées demeurent agressives, et non sur les réactions effectives. Celles-ci se produisent au contact des eaux capillaires et – dans la zone non saturée des aquifères – au contact des eaux hygroscopiques. La modestie des températures constituant un frein à la dissolution de la silice, en l'absence d'un manteau d'altérites désalcalinisées, il est normal que l'évolution actuelle présente, dans les faits, un caractère nettement bisiallitique.

En ce qui concerne les filiations entre les minéraux primaires et secondaires, les éléments d'appréciation disponibles reposent sur le calcul des indices RE et sur la détermination des minéraux argileux des formations superficielles les moins évoluées (teneurs moyennes dans la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  des rankers sur gneiss, micaschistes et leptynites : kaolinites = 13 %, illites-micas = 38 %, vermiculites plus ou moins hydroxyalumineuses = 44 %, chlorites = 3 %, interstratifiés 10-14 Å = 4 %). À la lumière de ces informations, il apparaît que :

- les biotites se transforment en vermiculites,
- les plagioclases alimentent des néoformations de ces mêmes minéraux, à moins qu'ils ne donnent des gels amorphes. En attribuant, pour les besoins de la démonstration, toute la silice évacuée des bassins versants aux seuls plagioclases, l'on s'aperçoit que les valeurs de l'indice RE correspondant à l'altération des feldspaths calco-sodiques atteignent pour le moins 2,7 à 3,0.

En utilisant un indice RA – inspiré de l'indice RE de TARDY (1969), mais calculé à partir des données concernant les profils d'altération (MARTIN, 1986) –, il s'avère que les gneiss altérés sous rankers témoignent d'une évolution monosiallitique ( $\text{RA} = 1,94$  – en prenant pour base de départ les roches saines), alors que les horizons superficiels résultent d'une évolution nettement bisiallitique ( $\text{RA} = 2,4$  depuis les roches saines). Des poches d'arènes non rubéfiées en place montrent à la fois une altération monosiallitique depuis les roches saines ( $\text{RA} = 2,1$ ) et bisiallitique depuis les roches altérées ( $\text{RA} = 2,6$ ). L'altération bisiallitique actuelle fait donc bien suite à une altération monosiallitique. Celle-ci a notamment été responsable de l'élaboration de sols rougeâtres, d'âge

Quaternaire, qui ont subi des phases de sulifluxion en nappe au cours des épisodes froids, et dont les lambeaux subsistent localement à la faveur de conditions topographiques favorables (CHEVALIER, 1984 ; MARTIN, 1986).

#### IV - L'INFLUENCE DES CONDITIONS CLIMATIQUES

Les méthodes d'investigation hydrogéochimique utilisées dans le massif des Maures permettent d'établir des comparaisons particulièrement instructives, en apportant une solution au problème posé par les variations spatio-temporelles de la pluviosité. Diverses corrélations (voir *supra*) fournissent, en effet, les moyens de calculer l'érosion chimique que subiraient les bassins versants pour des précipitations bien déterminées. Les éléments les plus intéressants sont la silice et le sodium, dont l'évacuation suit rapidement la mise en solution lorsque les bassins versants reçoivent des précipitations suffisamment abondantes. L'attention porte sur les bassins versants très arrosés de La Verne et du Rimbaud.

Le tableau IX indique les valeurs de l'érosion de la silice et du sodium déterminées pour des précipitations annuelles théoriques de 1000, 1500 et 2000 mm, et une répartition des pluies correspondant aux moyennes mensuelles de précipitations mesurées à Collobrières entre septembre 1925 et août 1979. Les exportations en solution ont été calculées mois par mois.

Tableau IX

**Bassins versants de La Verne et du Rimbaud : valeurs annuelles de l'érosion chimique de la silice et du sodium calculées pour des précipitations de 1000, 1500 et 2000 mm.**

P : précipitations ; D : drainage ; TES : taux d'érosion spécifique, t/km<sup>2</sup>/an.

*La Verne and Rimbaud drainage basins: annual values of the silica and sodium chemical erosion for different rainfall heights (1000, 1500 et 2000 mm). P: rainfalls; D: drainage; TES: annual specific erosion rates, t/km<sup>2</sup>/year.*

	La verne			Rimbaud		
P (mm)	D (mm)	TES SiO <sub>2</sub>	TES Na <sup>+</sup>	D (mm)	TES SiO <sub>2</sub>	TES Na <sup>+</sup>
1000	391,5	3,92	0,92	429,8	2,95	0,74
1500	759,6	6,85	2,04	830,7	5,23	1,74
2000	1155,1	9,75	3,26	1263,6	7,53	2,86

Pour des précipitations annuelles passant de 1000 à 2000 mm, les valeurs de l'érosion du sodium subissent une augmentation relative bien supérieure à celle des précipitations et de la lame d'eau écoulée. À l'évidence, l'accroissement des précipitations active le renouvellement des solutions riches en sodium qui remplissent les pores capillaires des formations superficielles et des roches altérées. Corrélativement, le rapport entre les valeurs de l'érosion de la silice et du sodium diminue. Le rapport SiO<sub>2</sub>/Na<sup>+</sup> est donc certainement moins élevé dans les eaux capillaires que dans les eaux gravitaires.

Les investigations sont prolongées dans le tableau X, en considérant que les bassins versants de La Verne et du Rimbaud reçoivent toujours des précipitations identiques à celles du bassin versant du Jas du Péou (994 mm/an, en moyenne). Pour l'établissement des bilans d'érosion annuels moyens, les exportations en solution sont calculées année par année. La vitesse de désodisation totale des roches trouvée pour le bassin versant du Rimbaud fait ressortir une plus grande résistance des gneiss par rapport aux micaschistes. Mais surtout, si l'on considère les bassins versants gneisso-

micaschisteux de La Verne et du Jas du Péou, on constate que l'érosion chimique, et donc l'altération des roches, augmentent avec la valeur du drainage. Les températures moyennes sont très semblables dans les deux cas ; les couverts végétaux diffèrent apparemment assez peu ; enfin, les formations superficielles les plus épaisses se rencontrent dans le bassin versant de La Verne (27 cm d'épaisseur en moyenne, contre 21 cm dans le bassin versant du Jas du Péou). La différence de drainage entre les bassins versants a donc certainement pour cause une plus forte porosité d'interstices des roches dans le bassin versant du Jas du Péou. Celle-ci constitue théoriquement un facteur favorable à l'altération, car elle permet une meilleure diffusion de l'eau au sein des matériaux minéraux. Toutefois l'augmentation de l'évapotranspiration qu'elle provoque limite la vitesse de descente de l'altération.

Tableau X

**Bassins versants de La Verne, du Rimbaud et du Jas du Péou : valeurs annuelles moyennes de l'érosion chimique de la silice et du sodium calculées pour des précipitations identiques (994 mm).** P : précipitations annuelles moyennes ; T : température moyenne ; D : lame écoulée annuelle moyenne ; TES : taux d'érosion spécifique annuel moyen, t/km<sup>2</sup>/an ; Vd : vitesse de désodisation totale des roches ; \* : sur gneiss, migmatites et micaschistes.

*La Verne, Rimbaud and Jas du Péou drainage basins: mean annual silica and sodium chemical erosion values calculated for the same rainfall height (994 mm). P: mean annual rainfalls; T: average temperature; D: mean annual drainage; TES: mean annual specific erosion rates, t/km<sup>2</sup>/year; Vd: total desodization velocity of rocks; \*: on gneiss, migmatites and micaschists.*

	La Verne	Rimbaud	Jas du Péou
P (mm)	994	994	994
T (°C)	12,9	12,2	13,0
D (mm)	440	485	328
TES SiO <sub>2</sub>	4,27	3,24	3,00 *
TES Na <sup>+</sup>	1,07	0,89	0,89 *
Vd (mm/1000 ans)	22,0	16,9	18,4 *

Dans le même ordre d'idée, le tableau XI compare les vitesses de désodisation totale obtenues à travers le monde pour des bassins versants cristallins. Les régions connaissant des températures élevées subissent une évapotranspiration très forte, qui limite considérablement le drainage et l'érosion chimique des bassins versants (Ouham, bassin amont du lac Tchad, Rusape). Toutefois la température n'agit pas toujours dans le même sens. Dans les bassins versants les plus frais (Hubbard Brook, Mont Lozère), la vitesse de désodisation totale reste faible, bien que les précipitations et le drainage soient abondants. Dans ce cas, l'influence de la température sur la vitesse de dissolution des minéraux joue un rôle prépondérant. Les valeurs très fortes de Vd enregistrées dans le massif des Maures résultent, quant à elles, de la combinaison de conditions favorables : précipitations annuelles moyennes avoisinant 1000-1200 mm, drainage des bassins versants compris entre 320 et 650 mm, températures moyennes de l'ordre de 12-13 °C. Le faible degré d'évolution géochimique des sols constitue aussi un élément à prendre en considération. En effet, au cours de leur trajet souterrain, toutes les eaux infiltrées rencontrent des matériaux riches en sodium.

Tableau XI

**Comparaison entre des vitesses de désodidation totale des roches (Vd, mm/1000 ans) mesurées dans le monde.** Réf. : références – 1, 2 et 3 : cette étude ; 4 : GAC et PINTA (1973) ; 5 : GAC (1979) ; 6 et 7 : OWENS et WATSON (1979) ; 8 : CLEAVES *et al.* (1970) ; 9 : JOHNSON *et al.* (1968) ; 10 : DUPRAZ (1984).

**Comparison between different total desodization velocities of rocks (Vd, mm/1000 years) measured in world.** Réf.: références – 1, 2 et 3: this work; 4: GAC and PINTA (1973); 5: GAC (1979); 6 et 7: OWENS and WATSON (1979); 8: CLEAVES *et al.* (1970); 9: JOHNSON *et al.* (1968); 10: DUPRAZ (1984).

Bassins versants	Roches	P (mm)	T (°C)	D (mm)	Vd	Réf.
La Verne	gneiss, micaschistes et leptynites	1 182	12,9	577	30	1
Rimbaud	gneiss	1 197	12,2	647	24	2
Jas du Péou	gneiss, migmatites et micaschistes	994	13,0	328	18	3
Ouham (Tchad)	granites, gneiss, etc.	1 410	26,0	246	11	4
Bassin amont du lac Tchad	granites, gneiss, etc.	1 210	26,1	121	6	5
Juliasdale (Rhodésie)	granites	1 220	13,8	400	14	6
Rusape (Rhodésie)	granites	922	17,1	88	4	7
Pond Branch (Maryland)	micaschistes	1 000	-	200	14	8
Hubbard Brook (New Hampshire)	gneiss	1 230	< 9	710	10	9
Bassin du Mont Lozère (France)	granites	1 914	< 6	1458	6	10

## V - LE RÔLE DE L'ÉROSION MÉCANIQUE

BUOL *et al.* (1973) proposent d'estimer la vitesse de transformation des roches en sols à l'aide de l'équation suivante :

$$V_t \text{ (mm roches/1000 ans)} = 100 D_i / [(C_i - S_i) \times d] \quad (8)$$

où  $D_i$  représente les pertes en l'élément  $i$  (en  $t/km^2/an$ ) ;  $C_i$  et  $S_i$ , les teneurs en cet élément des roches et des sols (en g/100 g de roches saines) ; et  $d$ , la densité des roches (en  $g/cm^3$ ).

En s'appuyant sur le sodium, les valeurs de  $V_t$  calculées pour l'évolution entre les roches saines et les rankers sont comprises entre 60 et 98 mm/1000 ans. Elles correspondent – théoriquement – à la formation de 2,4 m de rankers/10000 ans dans le bassin de La Verne, 1,9 m/10000 ans dans le bassin du Rimbaud et 1,4 m/10000 ans dans celui du Jas du Péou. Ces valeurs considérables en regard de la minceur des rankers, posent le problème de l'intervention éventuelle de l'érosion mécanique comme facteur limitant l'épaississement des profils.

En présence d'un couvert végétal, même réduit à l'état de maquis, l'érosion pluviale se révèle négligeable. Seuls les incendies modifient cette situation d'équilibre. Sur des parcelles

expérimentales défrichées, les pertes de terre dépassent  $1000\text{ t/km}^2/\text{an}$  (MARTIN, 1975, 1986, 1989). Les variations du climat depuis la fin de la dernière période glaciaire ainsi que la sporadicité des incendies, dont il est impossible de déterminer la fréquence, empêchent d'extrapoler, à l'échelle des temps géologiques, les mesures de l'érosion mécanique. L'évaluation des quantités de matériaux solides érodés au cours des derniers millénaires ne peut s'appuyer que sur l'examen des sols. Les observations morphologiques et géochimiques réalisées n'apportent, à cet égard, aucun élément d'appréciation. La réflexion repose entièrement sur les analyses sédimentologiques :

- Sur papier quadrillé semi-logarithmique, les courbes granulométriques des rankers présentent un faciès légèrement parabolique (Fig. 2). Pour les fractions allant des sables grossiers aux limons grossiers, l'étude menée sur la parcelle de la station de Lambert a montré que le ruissellement superficiel n'entraîne pas de façon préférentielle les éléments les plus fins (indice de sélectivité  $I_s$  : 0,74 pour les sables grossiers et les sables fins, 0,92 pour les sables moyens, 0,82 pour les limons grossiers –  $I_s$  = teneur dans les matériaux érodés / teneur dans les sols). La diminution de la pente au niveau des limons grossiers n'a donc pas de signification sur le plan de l'érosion mécanique. En revanche, les limons fins sont très facilement évacués ( $I_s$  = 1,87). Et l'on se doit par conséquent, en admettant que la végétation a toujours pu comme à l'heure actuelle se reconstituer assez rapidement après un incendie, d'interpréter le non-alignement des segments représentatifs des limons grossiers et des limons fins. Dans la mesure où les sols auraient subi une évolution suffisante pour que les deux segments se trouvent normalement dans le prolongement l'un de l'autre, il manquerait, selon les profils, 1 à 5 g de limons fins pour 100 g de terre fine.
- À la station de Lambert, le déficit en limons fins dans les horizons  $A_{12}$  des rankers atteint 5 g environ pour 100 g de terre fine. Connaissant, pour cette station, la composition granulométrique actuelle des sols et celle des matériaux érodés, en procédant par modifications successives de l'une et de l'autre jusqu'à stabilisation des données, l'on évalue à 31 % la part de la terre fine des sols susceptible d'avoir été enlevée sous l'effet du ruissellement diffus (MARTIN, 1986). Compte tenu de la richesse des sols en éléments  $> 2\text{ }\mu\text{m}$ , des teneurs en matière organique et en eau à  $105\text{ }^\circ\text{C}$  de la terre fine, les pertes de terre correspondraient dans ce cas à 23 % des matériaux minéraux de l'ensemble du sol. Même en considérant l'intervention du ruissellement concentré (dont les répercussions sont toujours limitées sur sols caillouteux et peu épais), l'érosion mécanique n'aurait certainement pas touché plus de 35 % des matériaux initiaux. Cette estimation représente la valeur maximale possible. En effet, les courbes granulométriques des arènes non rubéfiées en place, qui apparaissent localement sous les rankers, offre le même changement de pente entre les limons grossiers et les limons fins, alors que ces formations sont plus évoluées que les rankers au point de vue géochimique et qu'elles se trouvent à l'abri de toute érosion mécanique par les eaux pluviales. En outre, sur papier à ordonnées de probabilités (loi de GAUSS), les segments représentatifs des limons se placent dans un parfait alignement, pour les rankers comme pour les arènes.

## CONCLUSION

Avec des vitesses de désodisation totale des roches comprises entre 18 et  $30\text{ mm}/1000\text{ ans}$ , l'altération chimique se révèle extrêmement efficace. Elle appartient, par ailleurs, au type bisiallitique.

L'estimation de la vitesse de formation des rankers donne, pour les bassins versants étudiés, des valeurs supérieures à  $1,4\text{ m}/10000\text{ ans}$ , alors que les formations superficielles sont très minces (les épaisseurs moyennes vont de 21 cm dans le bassin versant du Jas du Péou à 34 cm dans celui du Rimbaud). Dans l'état actuel du manteau d'altérites, le front d'arénisation progresse beaucoup moins



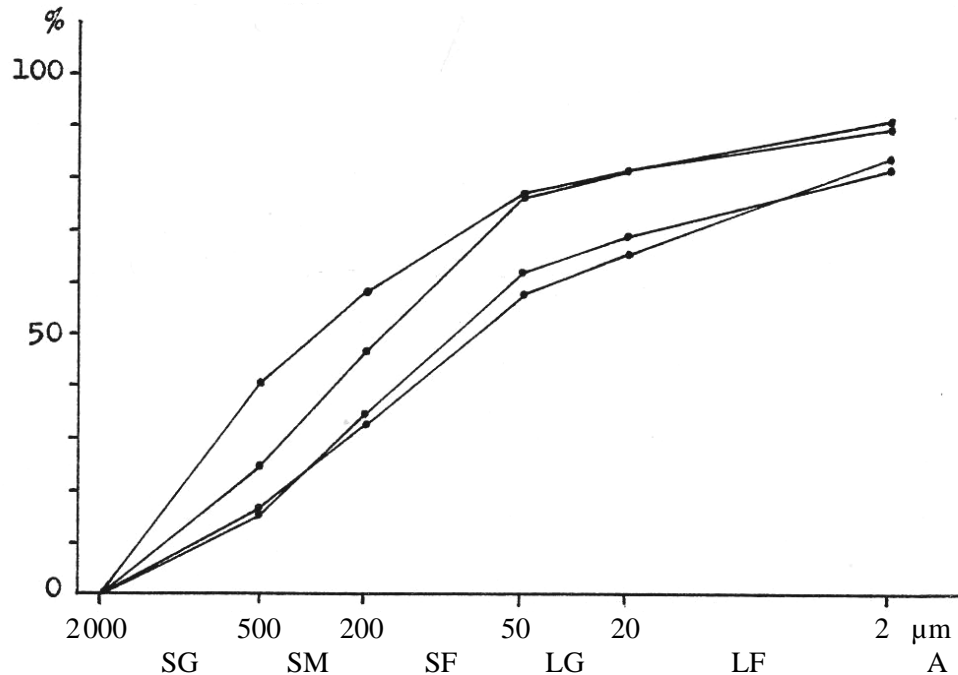
Figure 2

**Courbes granulométriques des rankers (horizon A<sub>12</sub>, sur gneiss, 15 échantillons ; seuls sont représentés les échantillons occupant une position extrême en l'un des points considérés).**

SG : sables grossiers ; SM : sables moyens ; SF : sables fins ; LG : limons grossiers ;  
LF : limons fins ; A : argile.

*Grain-size curves of rankers (A<sub>12</sub> horizon, on gneiss, 15 samples : we have only represented samples which appear in an extreme position for one of the considered points).*

*SG: coarse sand; SM: middle sand; SF: fine sand; LG: coarse silt; SF: fine silt; A: clay.*



vite que les fronts d'altération inférieurs. L'estimation réalisée surestime donc la transformation des roches en sols. L'étude granulométrique de la terre fine des rankers met en évidence le taux peu élevé de diminution des teneurs en particules fines sous l'effet du ruissellement superficiel. Ce résultat témoigne de la modestie de l'ablation des sols depuis l'apparition des rankers. La minceur des formations superficielles récentes résulte de la combinaison de deux facteurs : le décapage presque total des roches à la fin du Würm et la faiblesse du front d'arénisation depuis cette date.

**Remerciements :** Nous sommes reconnaissants aux services hydrologiques du CEMAGREF (Groupement d'Aix-en-Provence), de la Société du Canal de Provence et du SRAE (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur), ainsi qu'au Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen de l'aide qu'ils nous ont apportée. Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'UA 141 du CNRS (Meudon). Le manuscrit a bénéficié des remarques de J.L. PROBST.

## BIBLIOGRAPHIE

- BLOT A. (1980) - L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. *Tav. Doc. ORSTOM*, Paris, 114, 434 p.
- BOURRIÉ G. (1976) - Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride. Thèse Doct. Ing., Univ. Strasbourg et *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, (1978), 52, 174 p.

- BUOL S.W.F., HOLE F.D. et McCracken R.J. (1973) - Soil genesis and classification. The Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, p. 96-98.
- CHEVALIER Y. (1984) - Altération météorique actuelle et paléaltérations du socle provençal (France), évolution comparée des roches et des eaux de lessivage correspondantes. Étude physico-chimique et hydrogéochimique. Thèse Sci., Univ. Nice, 691 p.
- CLEAVES E.T., GODFREY A.E. et BRICKER O.P. (1970) - Geochemical balance of the small watershed and its geomorphic implications. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, p. 3015-3032.
- CONTI P. (1978) - La chaîne de La Verne (Maures, Var, France) : lithostratigraphie et pétrologie des formations cristallophylliennes. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Nice, 146 p.
- DUPRAZ C. (1984) - Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétations contrastées (Mont Lozère, France). Thèse Doc. Ing., Univ. Orléans, 363 p.
- GAC J.Y. et PINTA M. (1973) - Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Étude du bassin versant de l'Ouham (République Centrafricaine). *Cah. ORSTOM Sér. Géol.*, 1, p. 83-96.
- GAC J.Y. (1979) - Géochimie du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Sci., Univ. Strasbourg et *Trav. Doc. ORSTOM*, Paris (1982), 123, 251 p.
- GUEIRARD S. (1957) - Description pétrographique et zonéographique des schistes cristallins des Maures. Thèse sci., Univ. Marseille et *Trav. Lab. Géol. Marseille* (1959), VI, p. 71-264.
- GUIGO M. (1979) - Hydrologie et érosion dans l'Appenin septentrional. Thèse Let., Univ. Nice, 507 p.
- HÉNIN S. et CAILLÈRE S. (1965) - Minéralogie des argiles. MASSON, Paris, 355 p.
- JOHNSON N.M., LIKENS G.E., BORMANN F.H. et PIERCE R.S. (1968) - Rate of chemical weathering of silicate mineral in New Hampshire. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 32, p. 531-545.
- LELONG F. et WEDRAOGO-DUMAZET B. (1987) - Influence de la végétation sur la mobilisation chimique des éléments dans les bassins versants granitiques du Mont Lozère (France). In "Processus et mesure de l'érosion", Éd. du CNRS, Paris, Actes du 25<sup>ème</sup> Congr. internat. Géographie (UGI), Paris, 1984, p. 291-311.
- LOÏE-PILOT M.D. (1987) - Rythmes comparés de la dénudation chimique et de l'érosion mécanique dans un bassin versant méditerranéen montagnard granitique (Solenzara - Corse) (1979-1981). In "Processus et mesure de l'érosion", Éd. du CNRS, Paris, Actes du 25<sup>ème</sup> Congr. internat. Géographie (UGI), Paris, 1984, p. 313-328.
- MARTIN C. (1975) - L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal : les enseignements d'une station expérimentale. *Rev. Géomorph. Dyn.*, XXIV, p. 49-63.
- MARTIN C. (1981) - L'établissement de bilans hydrogéochimiques dans la partie occidentale du massif des Maures. Approche méthodologique. *Physio-Géo*, 2, p. 39-58.
- MARTIN C. (1986) - Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures. Thèse Let., Univ. Paris I, 935 p.
- MARTIN C. (1987) - Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines : comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var, France). *Z. Geomorph.*, 31, 1, p. 73-84.
- MARTIN C. (1989) - Dégradation d'un sol défriché sur gneiss à la station de Lambert (Massif des Maures, Var, France). *Rev. Géomorph. Dyn.*, sous presse.

- MATHIEU P. (1972) - Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier inter-tropical sur la migration des ions et sur les transports solides (Bassins de l'Amitioro, Côte-d'Ivoire). Thèse Sci, Univ Nice, 441 p.
- MIETTON M. (1988) - Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. Thèse Let., Grenoble. Paradigme, Caen, 497 p.
- OWENS L.B. et WATSON J.P. (1979) - Landscape reduction by weathering in small Rhodesian watersheds. *Geology*, 7, p. 281-284.
- PÉDRO G. (1968) - Distribution des principaux types d'altération à la surface du globe. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, 10, 5, p. 457-470.
- ROOSE É.J. (1980) - Dynamique actuelle des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Sci., Univ. Orléans et *Trav. Doc. ORSTOM*, Paris, 130, 569 p.
- SEYLER M. (1986) - Magmatologie des séries volcaniques métamorphiques. L'exemple des métavolcanites cambro-ordoviciennes, en particulier alcalines, du socle provençal (France). *Docum. Lab. Géol. Lyon*, 96, 371 p.
- TARDY Y. (1969) - Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci., Univ. Strasbourg et *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 31, 199 p.
- TRESCASES J.J. (1973) - L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères en Nouvelle-Calédonie. Thèse Sci., Univ. Strasbourg et *Mém. ORSTOM*, Paris, (1975), 78, 259 p.
- WALLING D.E. (1971) - Sediments dynamics of small instrumented catchments in South-East Devon. *Trans. Devonshire Assoc.*, 103, p. 147-165.
- WALLING D.E. (1978) - Reliability considerations in the evaluation and analysis of river loads. *Z. Geomorph.*, 29, p. 29-42.